

## 低碳超高强度 Q&P 钢板的热处理工艺和组织性能

董辰 江海涛 陈雨来 唐荻 程知松

(北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

**摘要** 试验的 Q&P (淬火和配分) 钢 (% : 0.17C, 1.40Si, 1.48Mn, 0.25Al) 由 7.5 kg 真空感应炉冶炼, 轧成 1.0 ~ 1.5 mm 钢板, 采用井式盐浴炉模拟了试验 Q&P 钢的热处理工艺, 经 910 °C 奥氏体化, 淬至 200 ~ 245 °C, 20 s, 升温至配分温度 300 ~ 450 °C, 60 ~ 600 s, 快冷。结果表明, 采用淬火 245 °C 20 s, 配分 300 ~ 350 °C ≥ 300 s 可保证碳原子由马氏体向残留奥氏体富集, 试验钢具有高的强塑积 (25 000 ~ 30 000 MPa%)。

**关键词** Q&P 钢 热处理 组织 强度和塑性

## Heat Treatment Process and Structure of a Low Carbon Super-high Strength Quenching and Partitioning Steel Plate

Dong Chen, Jiang Haitao, Chen Yulai, Tang Di and Cheng Zhisong

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** Test Q&P (quenching and partitioning) steel (% : 0.17C, 1.40Si, 1.48Mn, 0.25Al) was melted by a 7.5 kg vacuum induction furnace then rolled to 1.0 ~ 1.5 mm plate. The heat treatment process of the test Q&P steel plate was simulated by a shaft salt bath furnace with austenizing at 910 °C, quenching to 200 ~ 245 °C for 20 s, heating to partitioning temperature 300 ~ 450 °C for 60 ~ 600s, then quick cooling. Results show that with quenching to 245 °C for 20 s, partitioning at 300 ~ 350 °C for ≥ 300 s, it is available to assure the carbon atom accumulating to residual austenite from martensite and get high product of strength-elongation (25 000 ~ 30 000 MPa%).

**Material Index** Q&P Steel, Heat Treatment, Structure, Strength and Elongation

国内外钢铁企业都将高强度钢和超高强度钢作为重点研究目标, 先后开发出如双相钢 (DP 钢, Dual Phase)、复相钢 (CP 钢, Complex Phase)、相变诱导塑性钢 (TRIP 钢, Transformation Induced Plasticity Steel) 等, 其强度为 500 ~ 1 000 MPa, 在汽车上得到了广泛的应用。正在积极开展研究的孪晶诱导塑性钢 (TWIP 钢, Twin Induced Plasticity)、有诱导塑性的轻量化钢 (L-IP), 均具有非常优异的力学性能, 如高的应变硬化率并具有极高的塑性 (60% ~ 90%) 和较高的强度 (600 ~ 1 000 MPa)<sup>[1]</sup>。近几年, Speer 等<sup>[2-4]</sup>提出了一种新工艺: 淬火配分 (Quenching and partitioning)。此工艺可用来生产一种具有 TRIP 效应的、高强度和高塑 (韧) 性的马氏体钢, 即 Q&P 钢, 其室温组织是贫碳的板条马氏体和富碳残留奥氏体, 马氏体组织保证了钢的强度, 残留奥氏体由于在形变过程中发生相变诱发塑性而提高了钢的塑性, 钢的强度最高可以达到 1 400 MPa, 而对应塑性有 15%<sup>[5]</sup>。

### 1 实验材料和方法

#### 1.1 Q&P 热处理工艺

Q&P 热处理工艺示意图如图 1 所示。图中  $T_A$ 、 $T_Q$ 、 $T_P$ 、 $P_T$  分别表示奥氏体化温度、淬火温度、配分温度和配分时间。首先将试样加热到奥氏体化温度  $T_A$ , 保温一段时间后, 冷却到  $M_s$  和  $M_f$  间的淬火温

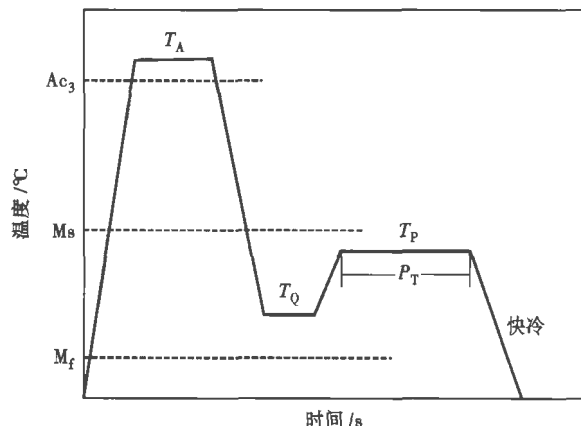


图 1 Q&P 工艺简图

Fig. 1 Schematics of Q&P process

度  $T_Q$ , 在此保温, 产生适量的马氏体后, 升温到配分温度  $T_P$  并恒温一段时间  $P_T$ , 让马氏体中的碳扩散到残留奥氏体中去, 使得残留奥氏体中的碳富集, 才可以在室温下保持稳定。

1.2 实验材料和方法

采用 7.5 kg 真空感应炉冶炼试验用钢。试验用 Q&P 钢的主要化学成分 (%) 为: 0.17C、1.40Si、1.48Mn、0.25Al、0.016P。热锻成 20 mm 厚的板坯后, 在  $\Phi 350$  mm 四辊/二辊热轧实验机进行模拟轧制, 经过热轧得到厚度为 3.5 mm 的热轧板坯, 最后经过 7 道次冷轧得到最终厚度为 1.0 ~ 1.5 mm 钢板。

用盐浴法进行 Q&P 钢的热处理工艺研究, 工艺参数如表 1 所示, 在 910 °C 奥氏体化温度保温 120 s 后, 改变淬火温度、配分温度及配分时间。

表 1 试验钢 Q&P 热处理工艺参数  
Table 1 Parameters of Q&P heat treatment for test steel

试样号	淬火温度/ °C	保温时间/ s	配分温度/ °C	配分时间/ s
1	200	20	350	120
2	250	20	350	120
3	280	20	350	120
4	300	20	350	120
5	245	20	300	120
6	245	20	350	120
7	245	20	400	120
8	245	20	450	120
9	245	20	350	60
10	245	20	350	120
11	245	20	350	300
12	245	20	350	600

2 试验结果分析

2.1 力学性能

随着淬火温度的提高, 试验钢的抗拉强度呈现

逐渐下降的趋势, 而伸长率却逐渐升高(图 2a)。因淬火温度越低, 得到的马氏体含量就越多, 残留奥氏体含量就越少, 所以 Q&P 钢的强度就随着淬火温度的降低而增高, 但是由于残留奥氏体量低, 塑性不高, 特别是在 200 °C 淬火。淬火温度越高, 马氏体含量越少, 残留奥氏体含量越多, 强度降低, 但塑性增加, 但是过高的  $T_Q$  使淬火后马氏体体量较少, Q&P 处理后, 残留奥氏体碳含量可能较低, 在室温下分解成珠光体和铁素体, 最终马氏体和残留奥氏体量都不高。

从图 2(b) 可以看出, 随着配分温度的升高, Q&P 钢的抗拉强度呈现逐渐下降的趋势, 伸长率一开始是逐渐升高, 在达到一定温度后呈下降趋势。随配分温度升高, 碳原子的扩散速度会增大, 在保温 120 s 时, 配分温度为 400 °C 时的残留奥氏体中的碳含量要高于配分温度为 300 °C 和 350 °C 时的残留奥氏体, 而且更稳定, 则伸长率呈现上升的趋势。在 400 °C 时强塑积达到最大 32 016 MPa%。配分温度达到 450 °C 时, 由于温度过高, 有可能会有碳化物的生成, 这样就减少了残留奥氏体中的碳含量, 则残留奥氏体就不能完全保留到室温, 而转变成其它组织, 同时就减弱了 TRIP 效应, 从而降低了 Q&P 钢的伸长率。

从图 2(c) 可以看出, 在 350 °C 的配分温度下, 随配分时间的增加, 抗拉强度呈现逐渐下降的趋势, 而伸长率呈逐渐升高的趋势。随配分时间的延长, 碳原子会从马氏体中扩散到残留奥氏体中, 残留奥氏体就易于保留下来, 从而其韧性增强。在配分时间分布为 60、120、300、600 s 时, 其强塑积分别为 18 105、21 000、25 760、30 227 MPa%。配分时间为 600 s 时的强塑积明显高于其它配分时间下的强塑

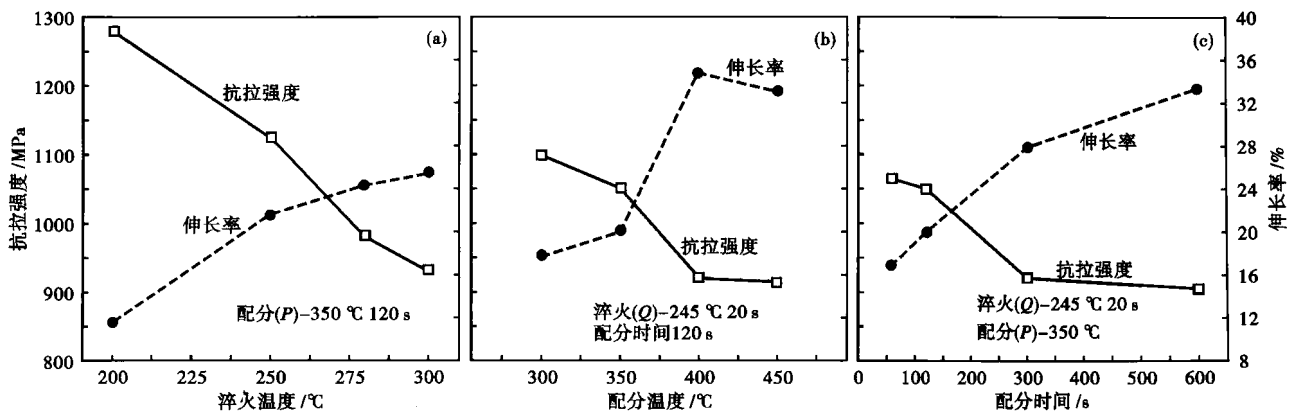


图 2 淬火温度  $T_Q$ (a)、配分温度  $T_P$ (b) 和配分时间  $P_T$ (c) 对试验钢抗拉强度和伸长率的影响

Fig. 2 Effect of quenching temperature  $T_Q$ (a), partitioning temperature  $T_P$ (b) and partitioning time  $P_T$ (c) on tensile strength and elongation of test steel

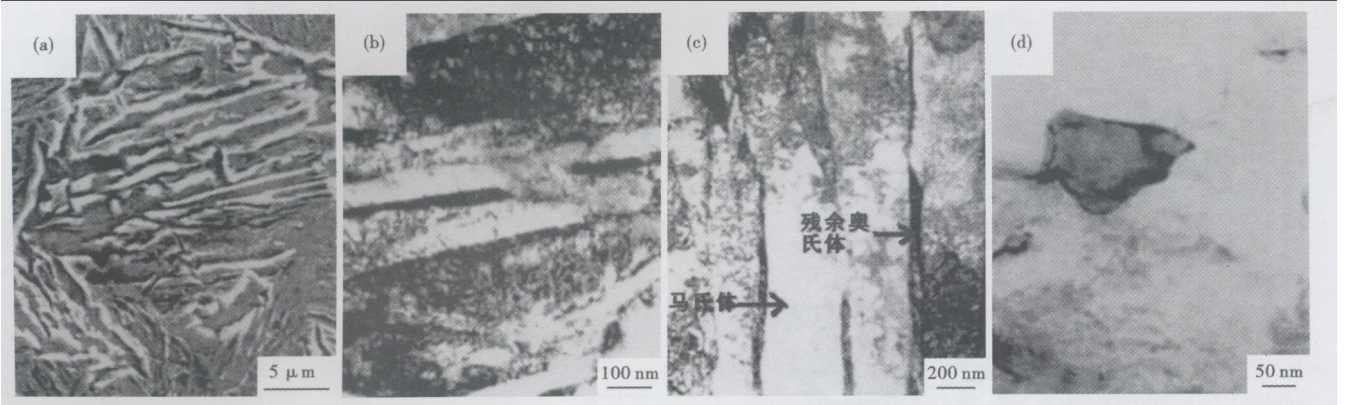


图 3 试验 Q&P 钢板组织形貌:SEM- (a) 典型马氏体组织;TEM- (b) 马氏体的位错结构;(c) 马氏体板条间残留奥氏体;(d) 晶界处的块粒状残留奥氏体

Fig. 3 Morphology of structure of test Q&P steel:SEM- (a) typical martensite structure; TEM- (b) dislocation structure of lath martensite; (c) residual austenite at inter lath of martensite; (d) block type austenite at grain boundary

积。由于在配分时间为 600 s 时,试验钢的伸长率要明显大于其它三者。

### 2.2 微观组织

Q&P 钢基体主要为马氏体组织(图 3a)。由于在扫描电镜下不能清楚地分辨残留奥氏体,采用 TEM-2000FX 型电镜进行精细结构观察,其精细结构如图 3(b,c,d)所示。图 3(b,c)为试验钢经 Q&P 工艺处理后典型的板条马氏体组织,且板条的亚结构为高密度位错。热处理组织主要是由交替排列的两相组成,选区电子衍射花样证明分布其间呈膜状组织为  $A_r$ ,观察同一透射样品还可发现少量的粒状残留奥氏体存在。

### 3 结论

(1) Q&P 钢有着高强度和高塑性,在成分(%)为 0.17C、1.48Mn、1.40Si、0.25Al 的实验 Q&P 钢中强塑积可以达到 32 016 MPa%。

(2) 在 300 ~ 350 °C 的配分温度下,较长的时间有利于碳的扩散,保证了碳原子由马氏体向残留奥氏体富集的能力,使得试验钢取得良好的强塑积。

国家自然科学基金资助项目(50405015)

### 参考文献

- 1 Horvath C D, Fekele J R. Opportunities and Challenges for Increased Usage of Advanced High Strength Steels in Automobile Applications. Proceedings of International Conference on Advanced High Strength Sheet Steels for Automotive Applications, AIST Golden CO, USA, 2004:1
- 2 Speer J G, Edmonds D V, Rizzo F C, et al. Partitioning of Carbon From Supersaturated Plates of Ferrite, with Application to Steel Processing and Fundamentals of the Bainite Transformation. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004, 8(3-4):219
- 3 Speer J G, Streicher A M, Matlock D K, et al. Quenching and Partitioning: a Fundamentally New Process to Create High Strength TRIP Sheet Microstructures. Symposium on the Thermodynamics, Kinetics, Characterization and Modeling of Austenite Formation and Decomposition, 2003:505
- 4 Speer J G, Rizzo F C, Matlock D K, et al. The "Quenching and Partitioning" Process: Background and Recent Progress. Materials Research, 2005, 8(4):417
- 5 赵松山,唐 荻,江海涛,等. Q&P 钢残留奥氏体定量分析及分布规律研究. 钢铁研究, 2007, 35(6):14

董 辰(1983-),男,硕士研究生,高强度汽车板 Q&P 钢的开发和研究。

收稿日期:2009-04-16

## 下 期 要 目

B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 作助熔剂对 CaO 基精炼渣系熔化温度的影响 .....	王宏明等
基于支持向量机回归的铸坯表面目标温度设定 .....	高凤翔等
重轨万能连轧变形计算的数学模型及其应用 .....	金 梁等
电渣冶金技术的最新发展趋势 .....	姜周华等
82A 钢高速线材控制冷却工艺的优化 .....	杭乃勤等
中间包内部结构对铸坯洁净度的影响 .....	唐海燕等
微张力减径机孔型设计对 45 钢厚壁管“内六方”的影响 .....	李秀莲等
环保型含 Bi 低碳高硫易切削钢的开发 .....	张文基等